

KARAKTERISTIK ION Na^+ dan Ca^{2+} TELAGA COASTAL AQUIFER DAERAH KAPUR MALANG SELATAN PADA PERIODE PASANG-SURUT

Himmatul Barroroh
(Dosen UIN Malang)

Abstract

Ion Ca^{2+} discharge have been investigated due to soil structure around coastal aquifer lake in limestone area at Bajulmati district Malang. As well as dynamics of ion Na^+ concentration according tidal elevation dynamic on the lake. Concentration of Na^+ and Ca^{2+} have been measured quantitatively including physico-chemistry variable influencing them, i.e. pH and temperature. This study carried out in two step, i.e. the first, ion Ca^{2+} concentration measure horizontally and vertically for mapping of the origin of ion Ca^{2+} discharge. The second is measurement of ion Na^+ concentration at definite sampling location for five different time with an hour range of each between tidal sea cycle. The result is compared with sea elevation measurement as long as tidal sea cycle and measurement of distance between coastal and the lake give a description about sea water intrusion dynamic to the lake. On mapping of ion Ca^{2+} concentration horizontally and vertically, show that the discharge map of ion Ca^{2+} originate only from a location in the edge of the lake that have cross section position to the dam. It seem that the water in lake is originate from a groundwater river. The ion Na^+ concentration dynamic show a linear pattern according with tidal sea elevation dynamic. There is a delay as long as intrusion process, while the dynamical curve of ion Na^+ concentration have a symmetrical graphic to tidal sea elevation dynamic curve.

Keyword: mapping, dynamic, Ca^{2+} , Na^+ , coastal aquifer lake, limestone area

PENDAHULUAN

Daerah Umbulrejo-Bajulmati terletak di Kec. Gedangan Kabupaten Malang, dengan kondisi perbukitan yang dekat dengan pantai selatan Laut Jawa. Daerah Umbulrejo-Bajulmati dan sekitarnya mempunyai tekstur geologi batuan berupa batuan kapur padas dengan susunan batuan berongga, sehingga memungkinkan terjadinya aliran air tanah melalui

equifer-equifer. Terdapat suatu permasalahan mendasar yang harus dipikul masyarakat selama ini, yaitu permasalahan kesulitan akan ketersediaan air. Di kawasan pesisir pantai Bajulmati, telah diketahui terdapat sebuah sumber air yang memungkinkan berpotensi untuk dikembangkan menjadi bahan baku guna distribusi air bersih yang lebih efisien, yaitu sebuah telaga yang merupakan tampungan aquifer dari dalam tanah kapur. Sumber mata air tersebut terletak di balik bukit sebelah selatan kawasan (Anonymous, 2005 : 3).

Dari hasil survey lapangan atas kelayakan penggunaan telaga tersebut untuk supply air bersih oleh dari sisi teknis distribusi oleh Lembaga Swadaya Masyarakat TRESNA, diketahui bahwa telaga tersebut layak untuk dikembangkan. Akan tetapi sampai saat ini masih belum diketahui karakteristik telaga itu sendiri secara mendetil. Karena telaga ini merupakan jenis coastal aquifer yang terletak dekat dengan laut dan berbasis tanah kapur, maka perlu dilakukan penelitian tentang karakteristik sumber aliran air telaga dan pengaruh pasang surut air laut terhadap terjadinya intrusi air laut ke dalam telaga melalui pengukuran sifat-sifat kimia karakteristik air di telaga tersebut, khususnya konsentrasi ion-ion Na^+ dan Ca^{2+} .

Penelitian tentang karakteristik Ca^{2+} dipusatkan pada pemetaan pelepasan ion Ca^{2+} dari struktur tanah disekitar telaga. Hal ini dimaksudkan untuk memperoleh gambaran tentang ada tidaknya sumber pelepasan Ca^{2+} . Keberadaan sumber pelepasan Ca^{2+} dapat menjadi indikasi bahwa sumber air telaga tersebut merupakan air sungai bawah tanah daerah kapur. Akan tetapi jika tidak ditemukan indikasi ini, artinya pelepasan Ca^{2+} terjadi secara merata dari seluruh sisi dasar telaga, maka dapat diduga bahwa sumber air telaga merupakan air rembesan dari struktur tanah yang lebih atas. Pentingnya penelitian ini dilakukan adalah karena potensi kerusakan yang ditimbulkan oleh pengambilan air dari suatu struktur tanah kapur, dimana pengambilan dalam jangka panjang dalam jumlah yang melebihi batas

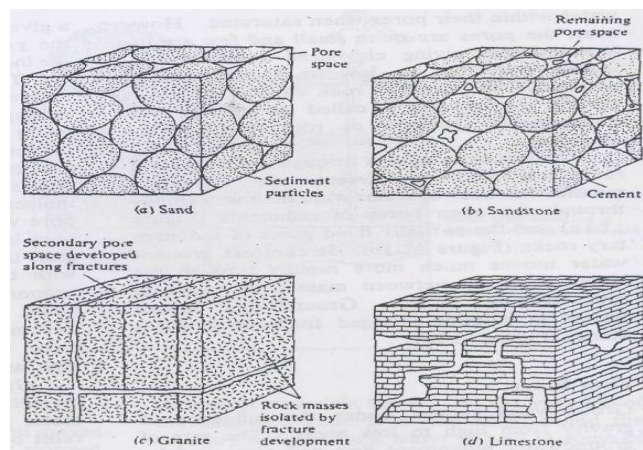
keseimbangan akan dapat menyebabkan terjadinya keruntuhan (*collapse*) struktur tanah kapur itu sendiri.

Penelitian tentang karakteristik ion Na^+ difokuskan pada dinamika perubahan konsentrasi ion Na^+ di dalam telaga terkait dengan terjadinya proses pasang surut air laut. Dari sini diharapkan akan dapat memberikan informasi tentang dinamika proses intrusi air laut ke dalam telaga.

KAJIAN PUSTAKA

Aquifer

Akumulasi air tanah di suatu tempat sangat bergantung pada jenis sedimen dan batuan di daerah tersebut. Kemampuan relatif batuan dan sedimen untuk menyimpan air tanah disebut **potensial air tanah** (*groundwater potential*). Potensial air tanah batuan dan sedimen akan besar jika porositasnya tinggi.



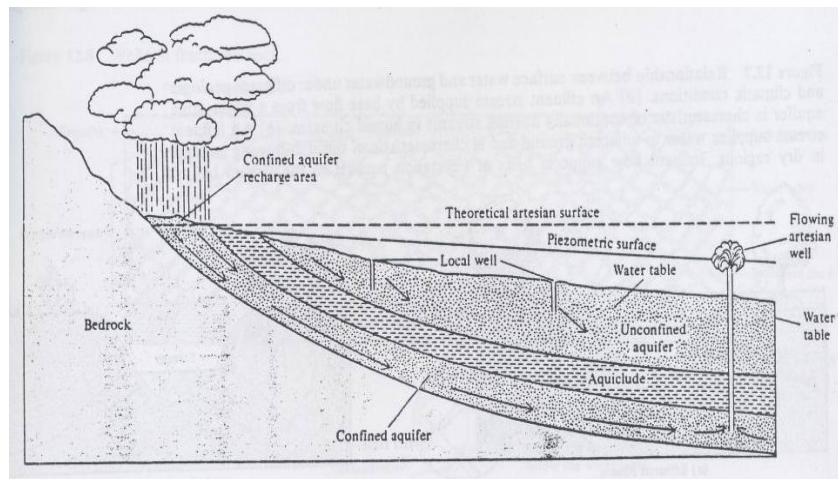
Gambar 1. Tipe porositas yang berkembang dalam sedimen dan batuan. (a) pasir: ruang pori diantara butiran. (b) batuan pasir (sandstone): ruang pori di daerah antara butiran yang tidak terisi semen/matriks. (c) granit: ruang pori sepanjang patahan di dalam batuan. (d) batuan kapur (limestone): ruang pori yang besar berkembang selama batuan kapur terlarut sepanjang sistem patahan.

Agar air tanah dapat bermigrasi, sedimen maupun batuan tidak hanya harus berpori tetapi ruang-ruang pori itu sendiri haruslah berinterkoneksi. Persentase volume sedimen atau batuan yang tersusun atas

ruang pori berinterkoneksi disebut **porositas efektif**. Porositas efektif ini dapat sama besar atau lebih kecil dari porositas total. Kemampuan suatu fluida untuk bergerak melalui suatu padatan disebut **permeabilitas**. Kerikil adalah bahan permeabel sedangkan batuan granit yang tidak memiliki retakan atau patahan adalah bahan yang tidak permeabel (impermeabel). Sedimen dan batuan yang permeabel harus bersifat porous, tetapi material berpori dapat bersifat impermeabel jika pori-porinya tidak berinterkoneksi. Suatu sedimen atau batuan permeabel yang mampu mentransmitkan air tanah disebut **aquifer**. Sedimen atau batuan impermeabel disebut **aquiclude**.

Jenis aquifer secara garis besar terdapat dua jenis yaitu aquifer bebas (unconfined aquifer) dan aquifer tertekan (confined aquifer). Aquifer bebas berasal dari infiltrasi air hujan pada permukaan tanah menuju ke bawah akibat gravitasi sehingga alirannya terhenti oleh adanya material impermeabel. Air tanah kemudian mulai terakumulasi di atas permukaan impermeabel. Secara bertahap mengisi ruang-ruang pori dan muncul kembali di atas permukaan tanah.

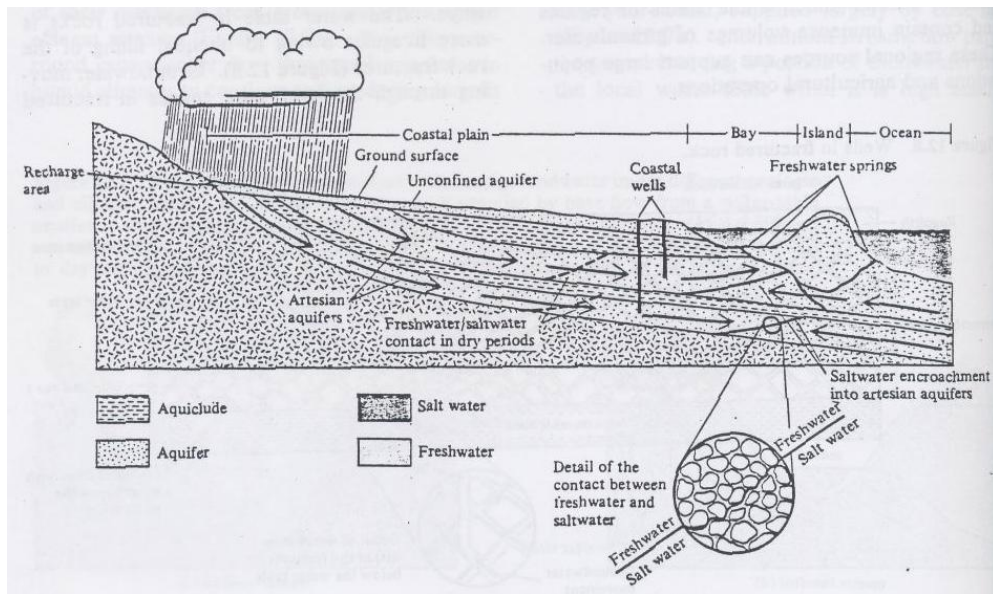
Aquifer tertekan berada di atas dan di bawah material impermeabel dan mengandung air tanah di bawah tekanan yang cukup besar, lebih besar daripada tekanan atmosfer disebut aquifer tertekan. Jika aquifer tertekan ini sedemikian hingga dapat keluar mencapai permukaan tanah, maka yang terjadi adalah senburan air tanah yang cukup kuat, air tanah semacam ini biasa disebut air artesis.



Gambar 2. Skema geologis yang menunjukkan aquifer bebas dan tertekan dan aliran sumur artesis.

Aquifer pantai (Coastal aquifer)

Aquifer-aquifer yang berkembang di daerah pantai agak berbeda dengan model aquifer secara umum dalam satu aspek yaitu: pori-pori aquifer pada ujung sisi pantai terisi oleh air asin. Air segar dan air asin dalam coastal aquifer berada dalam keseimbangan. Air segar (densitas = 1,00 g/cm³) lebih ringan daripada air asin (densitas = 1,025 g/cm³), karena itu air segar cenderung 'mengapung' di atas air asin di dalam ruang pori di mana kedua jenis air ini berkontak. Pada keadaan tertentu air asin dapat menembus ke dalam aquifer, hal ini disebut pelintasbatasan air asin (*saltwater encroachment*).

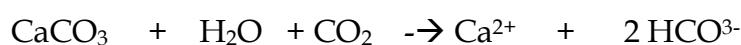


Gambar 3. Hubungan air tawar-air asin di coastal aquifer.

Aquifer Batuan Kapur (Limestone aquifer)

Aquifer batuan kapur berbeda dengan jenis aquifer yang lain dikarenakan air tanah tidak hanya sekedar bergerak melalui batuan kapur tetapi juga melarutkan batuan kapur pada suatu lokasi dan mendepositkan sebagian kalsium karbonat yang terlarut di lokasi yang lain. Air tanah yang bergerak melalui patahan di dalam batuan kapur secara bertahap memperbesar pembukaan oleh karena pelarutan, hal ini membuatnya semakin memungkinkan lebih banyak lagi air tanah yang dapat melewati batuan.

Batuan kapur tidak larut dalam air murni (H₂O), tetapi dapat larut dengan baik di dalam air yang berasam oleh adanya penambahan karbon dioksida (CO₂). Air yang menginfiltrasi permukaan tanah mengambil karbon dioksida dari material-material tumbuhan yang membusuk pada permukaan tanah paling atas, membentuk asam karbonat. Pelarutan batuan kapur dapat diilustrasikan oleh reaksi kimia sederhana:



Reaksinya bersifat dapat balik (Ludman and Coch, 1982 : 241-253).

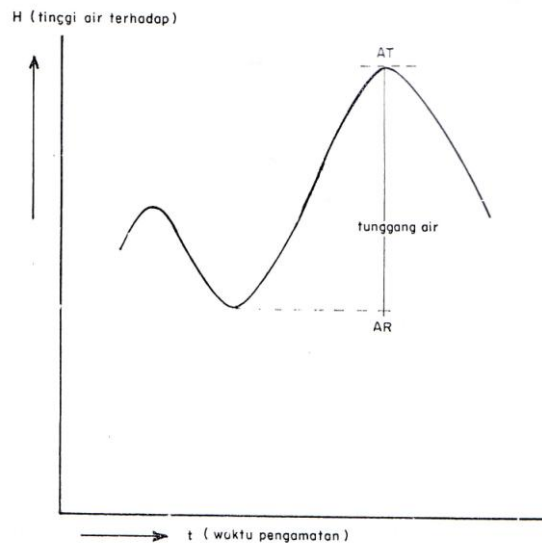
Kandungan air khususnya pada daerah batuan kapur memiliki karakteristik yang dapat diprediksikan dengan lebih jelas berdasarkan jenis batuan dan proses-proses yang mungkin terjadi pada aliran air di dalam batuan. Jika dibandingkan dengan standar air minum terjadi perubahan kandungan dalam air di daerah batuan kapur terutama pada sifat fisiko-kimianya yang meliputi pH, konduktansi, kandungan ion-ion Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , F^- , SO_4 , SiO_2 , Fe, Sr, alkalinitas, dan karbon anorganik (Mirecki et al., 1998 : 396-399).

Perubahan kandungan kimiawi ini terutama disebabkan oleh adanya reaksi transfer massa akibat pelarutan dari mineral-mineral batuan penyusun tanah kapur diantaranya adalah: calcite (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), halite (NaCl), gas CO_2 , dan silika amorfous (Mirecki et al., 1998 : 400-402 dan Cotton and Wilkinson, 1989 : 261).

Pasang Surut Air Laut

Permukaan air laut bukanlah merupakan suatu permukaan yang tetap (tenang), akan tetapi senantiasa berubah-ubah setiap saat. Perubahan kedudukan air laut yang berupa naik dan turunnya permukaan air laut, disebut pasang-surut air laut, disingkat pasut laut\ (Rochman Djaja, 1989 : 149)

Kedudukan permukaan air laut tertinggi disebut air tinggi tertinggi (highest high water) dan kedudukan permukaan air laut terendah disebut air rendah terendah (lowest low water). Keadaan tersebut terjadi pada saat bulan baru atau bulan purnama (spring tides) dan memiliki tunggang air yang besar. Sebaliknya, tunggang air yang kecil terjadi pada saat bulan quarter (neap tides) (Gambar 4).

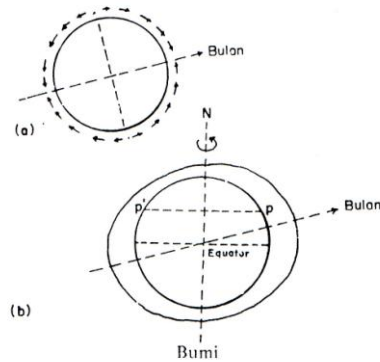


Gambar 4. Kedudukan permukaan air laut

Gaya Penggerak Pasut (Tide Generating Forces)

Dari semua benda angkasa yang mempengaruhi proses pembentukan pasut air laut, hanya matahari dan bulan yang sangat berpengaruh melalui tiga gerakan utama yang menentukan “denyut” paras laut di bumi ini. Ketiga gerakan itu adalah : revolusi bulan terhadap bumi, revolusi bumi terhadap matahari, perputaran bumi terhadap sumbunya. (Jonh I. Pariwono, 1989 : 13).

Reaksi laut di bumi terhadap Gaya Penggerak Pasut (GPP) di sebut pasut ekuilibria (equilibrium tide) bila seluruh permukaan bumi tertutup oleh air (tidak ada daratan sama sekali). Dalam teori PE ini, naiknya paras laut sebanding dengan potensi GPP. Pada gambar 5 ditunjukkan secara skematik sebaran PE yang disebabkan oleh bulan. Elevasi paras laut yang terjadi pada titik sublunar (titik di bumi yang berjarak terdekat dengan bulan) dan titik yang bertolak-belakang dengan titik sublunar. Pada suatu lokasi tertentu, misalnya titik P, akan dialami dua kali pasang dan dua kali surut.



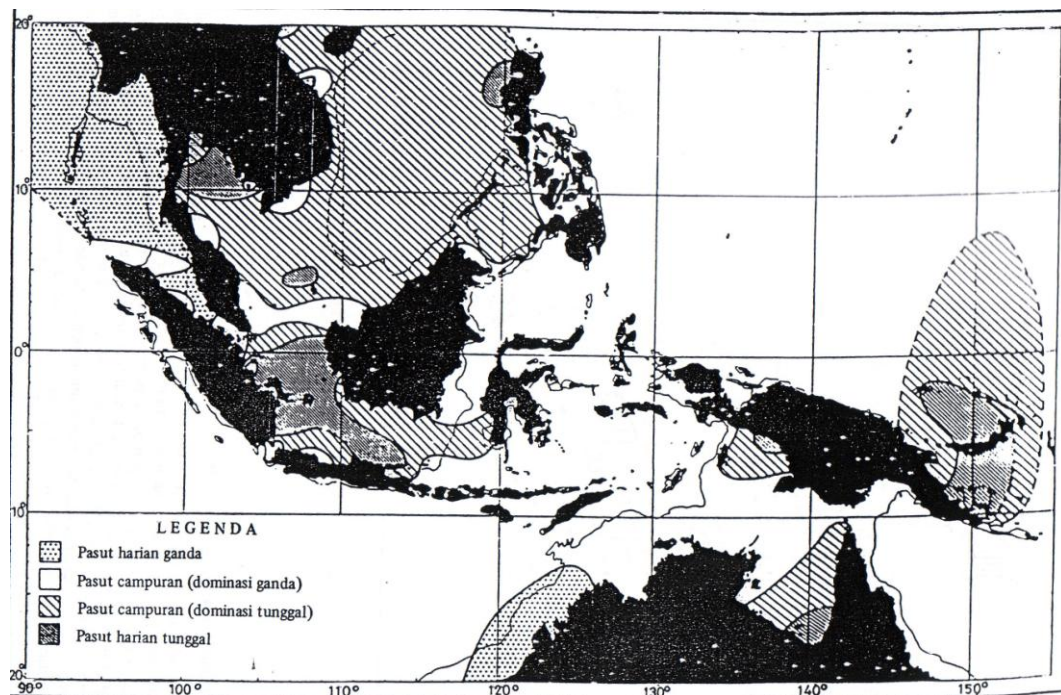
Gambar 5. Sebaran gaya penggerak pasut di permukaan bumi akibat gaya tarik bulan

Hal ini dikenal sebagai pasut tengah harian (semi diurnal tide). Kedua pasang yang dialami oleh titik P pada gambar 5 tidak akan sama tingginya. Ini disebabkan oleh adanya sudut deklinasi bulan terhadap bumi seperti yang telah disinggung di muka. Ketidak-samaan ini disebut sebagai ketidak-samaan harian (diurnal inequality) (Jonh I. Pariwono, 1989 : 18-20).

Dari pengamatan pasut selama satu hari dapat diperoleh data untuk penentuan jenis pasut sebagai berikut (Rochman Djaja, 1989 : 163):

1. Pasang surut tunggal beraturan (diurnal tide): pasang surut ini terjadi apabila dalam waktu 24 jam terdapat satu kali air tinggi dan satu kali air rendah.
2. Pasang surut ganda beraturan (semi diurnal tide): pasang surut ini terjadi apabila dalam waktu 24 jam terjadi dua kali air tinggi dan dua kali air rendah.
3. Pasang surut campuran (mixed tide): pasang surut ini terjadi apabila dalam waktu 24 jam terdapat kedudukan air tinggi dan air rendah tidak teratur.

Kondisi pasang surut di perairan Indonesia dapat dilihat seperti pada gambar 8 (Pariwono 1985 : 137).



Gambar 6. Peta sifat-sifat pasut perairan ASEAN (Pariwono, 1985 : 137)

Dinamika Air Tanah

Hal pertama yang penting dalam pengetahuan dinamika air tanah adalah harus diketahui struktur geologinya. Harus ditentukan stratigrafi vertikalnya, yaitu lapisan-lapisan vertikal satuan-satuan tanah, pasir dan batuan yang menyusun daerah tersebut. Dari data stratigrafi yang baik dan pengetahuan tentang gradien hidroulik pada daerah tersebut, dapat dihipotesiskan kemungkinan pergerakan dari kontaminan dan dapat dikembangkan suatu cara untuk menguji hipotesis (Schnoor, 1996 : 455).

Henry Darcy, mengembangkan suatu relasi empirik untuk air yang mengalir melalui media berpori. Darcy menemukan bahwa pelepasan spesifik berbanding langsung dengan energi gaya pendorong (gradien hidroulik) sesuai relasi berikut ini:

$$v_x = -K_x dh/dx$$

Dimana

$$v_x = \text{pelepasan spesifik pada arah-x, LT}^{-1}$$

dh = perubahan permukaan dari titik 1 ke titik 2, L

dx = jarak diantara dua titik 1 dan titik 2, L

dh/dx = gradien hidroulik pada arah-x, tak berdimensi

K_x = Konduktivitas hidroulik jenuh pada arah-x, LT^{-1}

Tanda negatif diperlukan karena air bergerak dari daerah dengan permukaan tinggi menuju permukaan yang rendah (negatif gradien hidroulik). Konduktivitas hidroulik jenuh K_x adalah ukuran dari sifat-sifat zat alir dan sifat-sifat media aquifer.

Pelepasan spesifik tanah v_x , kadang-kadang disebut sebagai kecepatan superfisial atau kecepatan Darcy. Akan tetapi nilai ini bukanlah nilai kecepatan aktual air yang bergerak melalui aquifer jika kita menginjeksikan suatu tracer. Kecepatan aktualnya adalah pelepasan spesifik dibagi dengan porositas fraksional dibawah kondisi jenuh. Nilainya akan lebih besar daripada pelepasan spesifik karena air berjalan terhimpit melalui ruang pori yang sempit, menghasilkan pergerakan yang lebih cepat.

$$u_x = v_x / n \text{ atau } u_x = v_x / n_e$$

Dimana u_x = kecepatan fluida aktual, LT^{-1}

n = Porositas atau volume ruang kosong dibagi total volume

n_e = Porositas efektif

Pada aquifer terkonsolidasi, porositas efektifnya dapat lebih kecil daripada porositas total. Porositas efektif merefleksikan volume pori terinterkoneksi melalui mana secara aktual air bergerak (Schnoor, 1996 : 457-459).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan eksperimental. Teknik analisa konsentrasi ion Na^+ dan Ca^{2+} sesuai dengan *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Penelitian dilakukan dalam dua tahap yaitu pengukuran konsentrasi ion Ca^{2+} secara horisontal pada permukaan

telaga dengan kedalaman tertentu untuk memetakan ada tidaknya sumber pelepasan ion Ca^{2+} secara horisontal. Pengukuran konsentrasi Ca^{2+} juga dilakukan secara vertikal pada suatu titik tertentu di telaga untuk memetakan apakah terdapat sumber pelepasan Ca^{2+} dari dasar telaga. Konsentrasi ion Na^+ juga diukur secara vertikal pada tepi dan tengah telaga untuk mencari tahu ada tidaknya osilasi konsentrasi ion Na^+ dibandingkan dengan ion Ca^{2+} secara vertikal.

Penelitian tahap kedua adalah pengukuran konsentrasi ion Na^+ pada saat terjadi pasang air laut sampai pada saat air laut mengalami surut. Titik sampling dipilih pada kedalaman dan jarak tertentu dari tepi telaga dimana terukur konduktivitas di lapangan paling tinggi. Pengukuran ini dipadukan dengan pengukuran elevasi air laut selama pasang dan surut serta pengukuran jarak pantai dengan telaga untuk dapat memberikan gambaran dinamika intrusi air laut ke dalam telaga melalui gambaran dinamika ion Na^+ . Nilai variabel-variabel yang diukur adalah nilai individual tiap sampel.

Variabel-variabel sifat fisiko-kimia yang hendak diukur adalah: Variabel utama: konsentrasi ion Na^+ dan Ca^{2+} , variabel yang berpengaruh: pH dan Temperatur, variabel untuk menentukan titik sampling Na^+ : Konduktivitas, variabel yang berpengaruh terhadap dinamika ion Na^+ : tinggi air laut dan jarak pantai dengan telaga

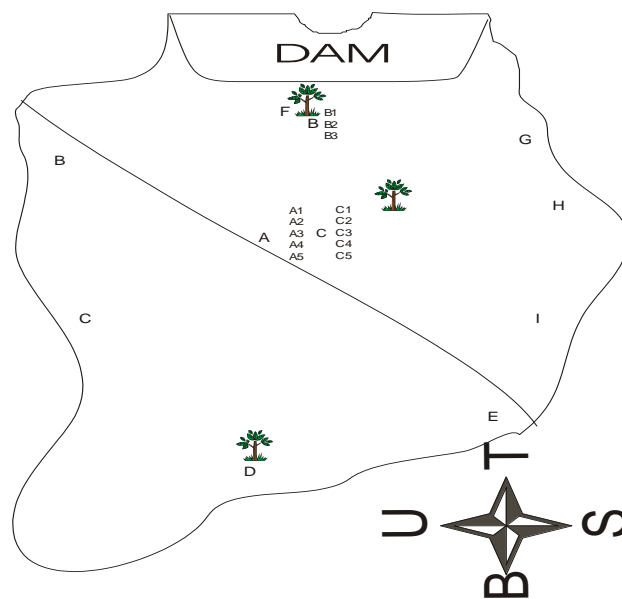
Data yang diperoleh adalah data pengukuran dengan jenis data rasio yang dianalisis secara deskriptif. Data pemetaan ion Ca^{2+} digambarkan dalam bentuk diagram horisontal dan vertikal langsung dibandingkan dengan posisi-posisi aktual pada peta telaga untuk memberikan gambaran deskriptif yang jelas. Sehingga dapat ditarik kesimpulan ada tidaknya sumber pelepasan ion Ca^{2+} di dalam telaga, serta posisinya secara tepat. Data pemetaan konsentrasi ion Ca^{2+} secara vertikal dibandingkan langsung secara grafik dengan konsentrasi ion Na^+ secara vertikal pada titik-titik yang sama untuk melihat ada tidaknya osilasi konsentrasi ion pada satu saat.

Data dinamika perubahan ion Na^+ di telaga selama pasang-surut air laut digabungkan dengan data elevasi air laut selama pasang-surut. Digambarkan secara grafik untuk melihat adanya pola intrusi air laut yang tertentu.

TEMUAN PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pemetaan Konsentrasi Ion Ca^{2+} di Telaga

Gambar telaga dilihat dari atas akan berbentuk mendekati seperti pada gambar di bawah ini. Dalam gambar peta telaga ini juga ditunjukkan titik-titik dimana sampling dilakukan baik secara horisontal maupun vertikal.



Gambar 7. Peta lokasi telaga dan titik-titik sampling.

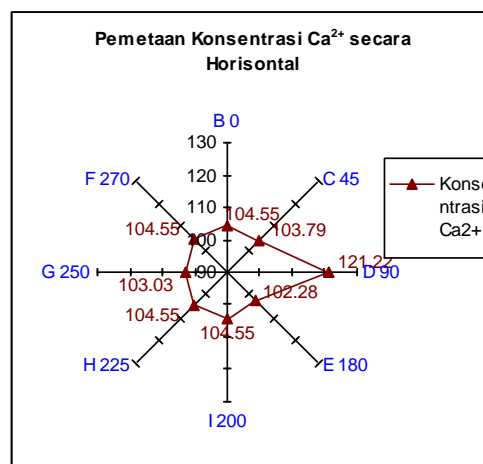
Pemetaan secara horisontal

Dari pemetaan konsentrasi ion Ca^{2+} secara horisontal yang dilakukan pada 9 titik. Terdiri atas 8 titik di tepi telaga pada jarak kira-kira 1,5 m dari tepi telaga dan 30 cm dari permukaan telaga serta satu titik ditengah telaga pada jarak kira-kira 10 m dari tepian telaga dan 30 cm dari permukaan telaga. Dapat dilihat sebaran konsentrasi ion Ca^{2+} yang cenderung seragam

hampir merata pada semua titik, dengan konsentrasi ion Ca^{2+} sebesar 104 mg/L. Hanya terdapat satu lokasi sampling dimana konsentrasi ion Ca^{2+} jauh lebih besar dari titik sampling yang lain, yaitu pada titik sampling D (lihat gambar 7), dengan nilai sebesar 121,22 mg/L.

Penampilan fisik telaga secara horisontal menampakan bahwa permukaan air di dekat DAM berwarna kecoklatan yang mencerminkan dangkalnya daerah di dekat DAM. Pada lokasi yang berhadapan (berseberangan) dengan DAM, warna permukaan air adalah hijau tua yang mencerminkan kedalamannya yang lebih dalam. Di tengah telaga telah diukur kedalaman dasar telaga mencapai 32 m.

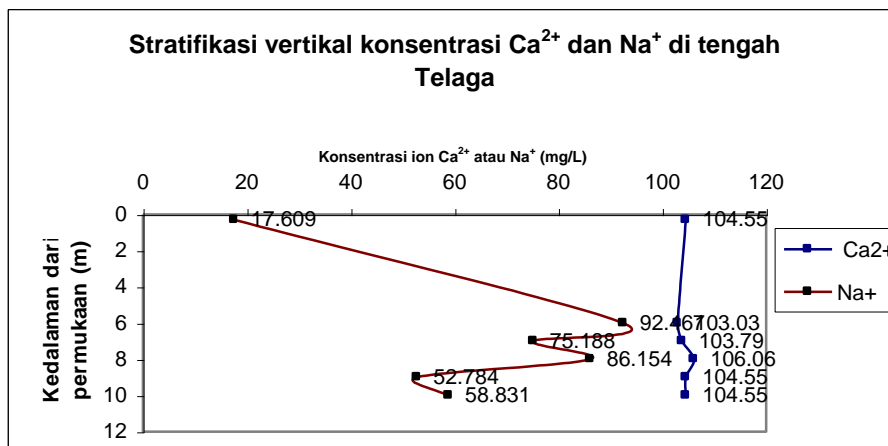
Dari kenyataan tentang besarnya konsentrasi ion Ca^{2+} pada satu sudut titik sampling, dan merata di tempat lainnya, patut diduga bahwa terdapat satu sumber munculnya pelepasan ion Ca^{2+} . Dengan memahami bahwa pelepasan Ca^{2+} di daerah kapur merupakan hasil reaksi antara asam dengan batuan kapur (CaCO_3), maka dapat diperkirakan bahwa air sumber telaga berasal dari satu sumber bawah tanah yang mungkin juga dapat berbentuk aliran sungai bawah tanah. Dengan mempertimbangkan kedalaman dasar telaga dan kenyataan debit air telaga yang tetap, baik pada musim kemarau maupun musim penghujan, dapat diperkirakan bahwa sumber air telaga merupakan aliran confined groundwater.



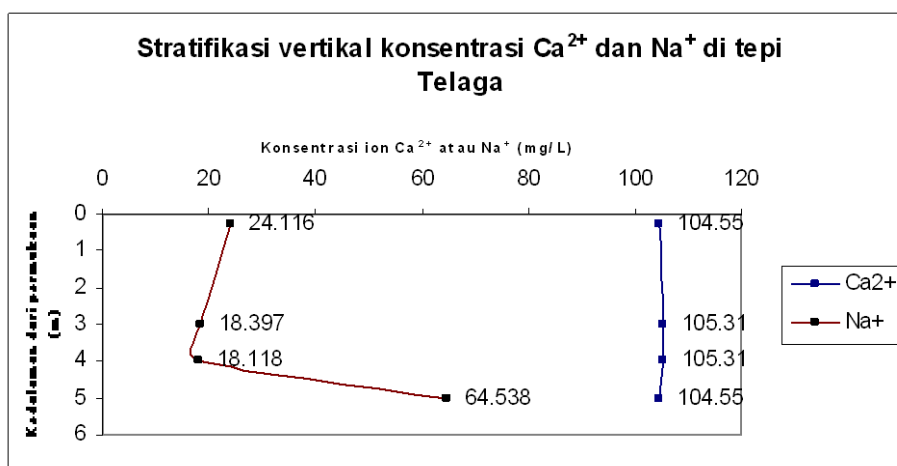
Gambar 8. Grafik konsentrik pemetaan konsentrasi ion Ca^{2+} secara horisontal.

Pemetaan secara vertikal

Perpaduan data pemetaan secara vertikal konsentrasi ion Na^+ dan Ca^{2+} baik di tepi maupun di tengah telaga, menunjukkan bahwa konsentrasi ion Na^+ di telaga berjumlah lebih kecil daripada konsentrasi ion Ca^{2+} , akan tetapi perubahan konsentrasi Na^+ sesuai kedalaman terjadi dengan sangat mencolok. Sementara konsentrasi ion Ca^{2+} secara vertikal cenderung konstan. Sehingga dapat diduga bahwa terjadinya perubahan konsentrasi Na^+ memang disebabkan oleh adanya pasokan ion Na^+ dari laut dan bukan hasil dari pelucutan dari tanah di sekitar telaga.



Gambar 9. Pemetaan konsentrasi Na^+ dan Ca^{2+} secara vertikal di tengah telaga



Gambar 10. Pemetaan konsentrasi Na^+ dan Ca^{2+} secara vertikal di tepi telaga (DAM)

Dinamika ion Na⁺ Terkait Pasang-Surut Air laut

Hasil dari pengukuran pasut pantai selatan kabupaten Malang di lapangan pada hari H selama selang waktu 6 jam yakni pada tanggal 11 Juli 2006 adalah sebagai berikut:

Tinggi Alat (cm)	Titik	Jarak (m)	Elevasi (cm)	Elevasi dng batas air surut sebagai titik nol (cm)	Jam
143 E	D	14.3	3.25	140.5	9.30
	F	30.9	24.75	119	12.00
	G	55.8	85.25	58.5	13.30
	H	71.2	143.75	0	15.00

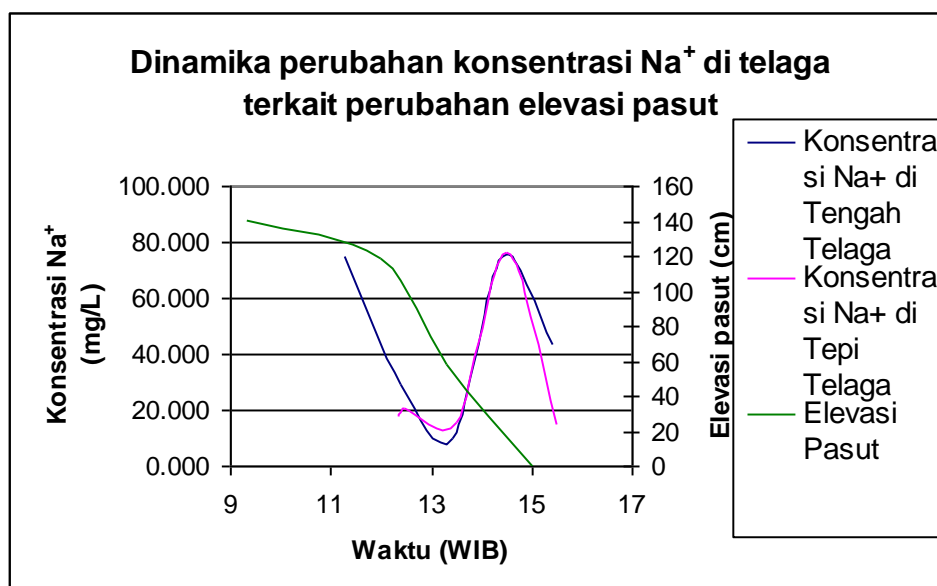
Data ini menunjukkan siklus pasut sebesar setengah siklus. Jadi satu siklus pasut akan berlangsung selama sekitar 12 jam, yang berarti bahwa jenis pasut di perairan pantai selatan kabupaten Malang adalah tipe semi diurnal.

Jarak antara telaga dengan pantai jika ditarik garis lurus, mencapai 210, 59 m, dengan dekatnya jarak telaga dengan pantai ini, diperkirakan intrusi air laut akan mencapai telaga.

Dengan memperhatikan data dinamika perubahan konsentrasi ion Na⁺ di telaga terhadap perubahan tinggi air laut pada saat pasang dan surut (lihat gambar 11), dapat diambil beberapa kesimpulan. Pertama, kurva perubahan konsentrasi ion Na⁺ di tengah telaga dan di tepi telaga (DAM) berimpit, yang mengimplikasikan bahwa difusi ion Na⁺ di dalam telaga terjadi secara cukup cepat. Sehingga dapat dikatakan tidak ada selang waktu difusi.

Kurva dinamika perubahan konsentrasi ion Na⁺ ini berbentuk hiperbola dengan adanya titik terendah (lembah) dan titik tertinggi (puncak) yang simetris. Hal ini menunjukkan bahwa laju intrusi relatif sama dengan

laju destruksi air laut, artinya tidak terjadi fenomena hysteresis. Intrusi terjadi melalui mekanisme adsorpsi cairan melalui padatan (batuan berpori). Secara teori, Laju adsorpsi yang sama dengan laju desorpsi menunjukkan bahwa pori-pori padatan yang dilalui tidak memiliki caviti-caviti yang akan menampung zat terasorpsi tertinggal. Jadi, dapat diperkirakan bahwa struktur pori batuan antara pantai dan telaga memiliki porositas yang baik.



Gambar 11. Grafik dinamika perubahan konsentrasi Na⁺ di telaga terkait perubahan elevasi pasut

Konsentrasi ion Na⁺ tertinggi ditemukan pada pengukuran pada jam 14.40-an dengan nilai sekitar 7,5 mg/L (lihat puncak kurva konsentrasi ion Na⁺ pada gambar 11). Dari perbandingan puncak kurva konsentrasi ion Na⁺ dengan puncak ketinggian air laut (pasang), ditemukan adanya delay. Puncak tertinggi kurva elevasi pasut dan baru menurun tajam terjadi pada pengukuran pasut jam 9.30-12.00. Hal ini mudah dipahami karena memang dibutuhkan waktu untuk proses adsorpsi air laut melalui batuan sehingga sampai menuju telaga, yaitu berkisar selama 2-3 jam. Meskipun terjadi delay, akan tetapi kurva dinamika perubahan konsentrasi ion Na⁺ berbentuk relatif

simetris dengan kurva elevasi pasut air laut. Sehingga terdapat hubungan yang linear antara konsentrasi Na^+ di telaga dengan tinggi elevasi pasut air laut.

$$[\text{Na}^+]_{\text{T}} \propto h$$

Dimana $[\text{Na}^+]_{\text{T}}$ = konsentrasi ion Na^+ di telaga

h = tinggi elevasi pasut air laut.

Pemetaan konsentrasi ion Ca^{2+} baik secara horisontal maupun vertikal menunjukkan bahwa KESIMPULAN

1. peta pelapasan ion Ca^{2+} hanya bersumber dari satu titik di tepian telaga yang berseberangan dengan posisi DAM. Pelepasan ion Ca^{2+} tidak berasal dari segenap tanah di tepian telaga. Jadi dapat diperkirakan bahwa air sumber telaga berasal dari semacam sumber atau sungai bawah tanah.
2. Dinamika perubahan konsentrasi ion Na^+ di telaga coastal aquifer ini memiliki hubungan yang linear dengan perubahan elevasi pasut air laut. Terdapat delay selama proses intrusi, akan tetapi kurva dinamika perubahan konsentrasi ion Na^+ simetris terhadap dinamika elevasi pasut air laut.

DAFTAR PUSTAKA

-----, 2005, *Laporan Survey Pendahuluan Pengembangan Air Bersih di Dusun Umbulrejo Desa Sidodadi Kecamatan Gedangan Kabupaten Malang*, Lembaga Swadaya masyarakat TRESNA, Malang.

Cotton, F.A., dan Wilkinson, G., 1989, *Kimia Anorganik Dasar*, UI-Press, Jakarta.

Greenberg, A.E., Connors, J.J., Jenkins, D., 1981, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 15th ed., American Public Health Association, Washington.

- John I. Pariwono, 1989, Gaya Penggerak Pasang-Surut, *Pasang-Surut*, ASEAN-AUSTRALIA COOPERATIVE PROGRAM ON MARINE SCIENCE, PROJECT I: TIDES AND TIDAL PHENOMENA, Puslitbang Oseanologi LIPI, Jakarta
- John I. Pariwono, 1989, Kondisi Pasang-Surut di Indonesia, *Pasang-Surut*, ASEAN-AUSTRALIA COOPERATIVE PROGRAM ON MARINE SCIENCE, PROJECT I: TIDES AND TIDAL PHENOMENA, Puslitbang Oseanologi LIPI, Jakarta
- Ludman A., Coch N.K., 1982, *Physical Geology*, Mc-Graw- Hill Inc., New York.
- Mirecki, J.E., Campbell, B.G., Conlon, K.J., Petkewich, M.D., 1998, Solute Changes During Aquifer Storage Recovery Testing in a Limestone/Clastic Aquifer, *Ground Water*, Vol.36, No.3.
- Rochman Djaja, 1989, Pengamatan Pasang-Surut Laut untuk Penentuan Datum Ketinggian, *Pasang-Surut*, ASEAN-AUSTRALIA COOPERATIVE PROGRAM ON MARINE SCIENCE, PROJECT I: TIDES AND TIDAL PHENOMENA, Puslitbang Oseanologi LIPI, Jakarta
- Schnoor, L. J., 1996, *Environmental Modelling*, Fate and Transport of Pollutants in Water, Air and Soil, John Willey & Sons, Inc. New York.